
Thermale Infrarotaufnahmen als Prospektionsgrundlage

Das Prospizieren im Feld ist mühsam und zeitaufwändig. Mittels moderner Technologien könnte dies geändert werden.

 Lukas Zurbuchen

Problemstellung

Nicht nur für die Höhlenforschergemeinde ist es sinnvoll die Ausdehnung von Höhlen in Karstregionen zu kennen. Bei Tunnelbauten kann es immer wieder vorkommen, dass Höhlengänge angebohrt werden und dadurch Probleme, sei es hydrologischer oder statischer Natur, entstehen. Ebenso stehen Karsthöhlen immer wieder im Zusammenhang mit Trinkwasser. Durch die Kenntnisse der Lage von Höhlensystemen kann Karstwasser besser geschützt werden.

Der übliche Ansatz um Höhlen zu entdecken, ist Höhleneingänge zu Fuss im Gelände aufzusuchen und den Verlauf der Höhle anschliessend zu vermessen.

In meiner Diplomarbeit am geographischen Institut der Universität Zürich habe ich einen alternativen Ansatz zur Detektion von Höhleneingängen verfolgt. Die Bedingungen für ein erfolgreiches Aufspüren von Höhleneingängen und die Grenzen einer Detektion mittels einer auf einem Helikopter montierten Wärmebildkamera werden hier nun aufgezeigt.

Was kann man auf einem Wärmebild erkennen?

Die Wärmebildkamera erkennt Temperaturdifferenzen auf einer Oberfläche. Daher ist es nicht möglich, die Temperatur der Luft zu sehen, sondern nur deren „Abdruck“ auf einer Oberfläche. Ein weiteres Problem entsteht dadurch, dass Oberflächen aus verschiedenen Materialien bei gleicher Temperatur einen unterschiedlichen Grauwert, d.h. also einen scheinbaren Temperaturunterschied, aufweisen. Das kommt daher, dass reale Oberflächen elektromagnetische Wellen¹ weniger

¹ Zu den elektromagnetischen Wellen zählen z.B. Ultraviolettstrahlung, sichtbares Licht, aber auch Thermalstrahlung oder Radiowellen

intensiv abstrahlen, als ein idealisierter Schwarzkörper. Um diesen scheinbaren Temperaturunterschied zu korrigieren, müsste von jeder Oberfläche das Verhältnis² der Abstrahlung zur Abstrahlung eines Schwarzkörpers (bei gleicher Oberflächentemperatur) bekannt sein. Mit dem in meiner Arbeit verwendeten Sensor sind Temperaturdifferenzen von ca. 0.2°C auf Oberflächen gleicher Materialien erkennbar. Das Thermalbild (Abb. 1) zeigt dunkel kalte Temperaturen und hell warme Temperaturen. Im Wärmebild kann man klar erkennen wo die Person vor kurzer Zeit auf dem Untergrund gelegen hat.



Abb. 1: Eine Person und ihr "Wärmeabdruck" auf dem Boden. Bildquelle: VBS

Was sind die Voraussetzungen damit ein Höhleneingang im Thermalbild erkennbar wird?

Da die Temperatur im Innern der Höhle im Jahresverlauf als konstant angesehen werden kann, entsteht durch den Temperaturunterschied zwischen Aussenatmosphäre und Temperatur im Höhleninnern eine konvektive Luftzirkulation. Im Sommer, wenn die Luft in der Höhle kühler und somit schwerer als die Aussenluft ist, sinkt diese Luft ab und strömt aus den meteotiefen Ausgängen aus. Im Winter steigt die Luft im Höhleninnern und bringt die Schneedecke bei den meteohohen Eingängen zum Schmelzen.

² Wird im Fachjargon „Emissionskoeffizient“ genannt. Ich möchte hier auf das Planck'sche Strahlungsgesetz, das Stefan-Boltzmann-Gesetz, sowie das Wiensche Verschiebungsgesetz verweisen.

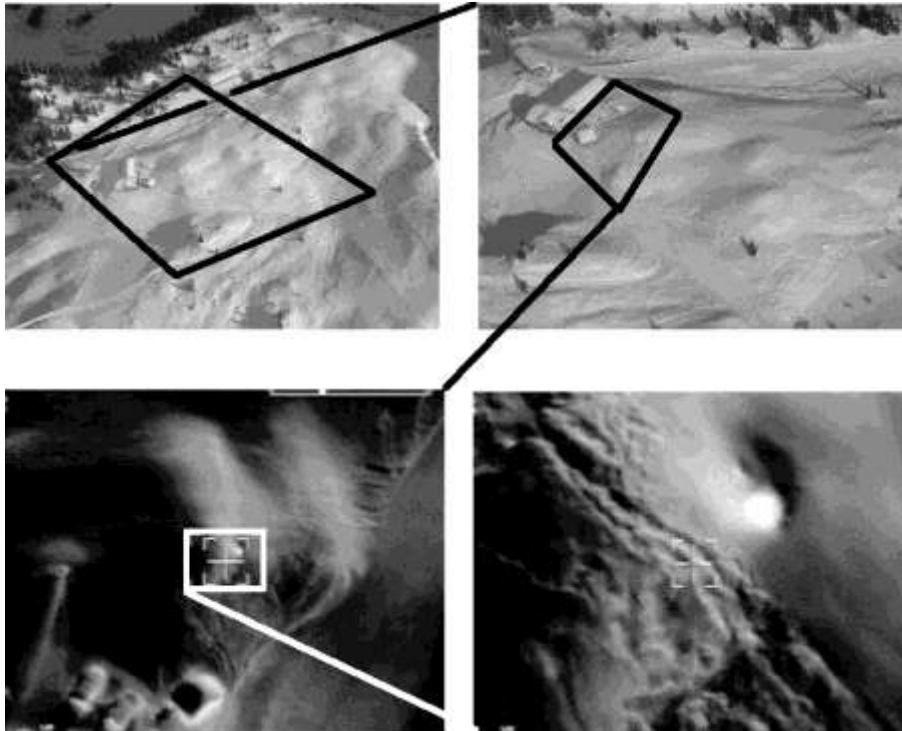


Abbildung 3:
Oben: Fotos aus dem Helikopter;
Unten: Wärmebilder, der Rahmen kennzeichnet jeweils die Lage des nächsten Bildes
 Bildquelle:
 M. Trüssel (oben),
 VBS (unten)

Es entstehen die typischen Blaslöcher, welche auch auf dem thermalen Infrarotbild erkennbar sind. (Abb. 2 und Abb. 3)

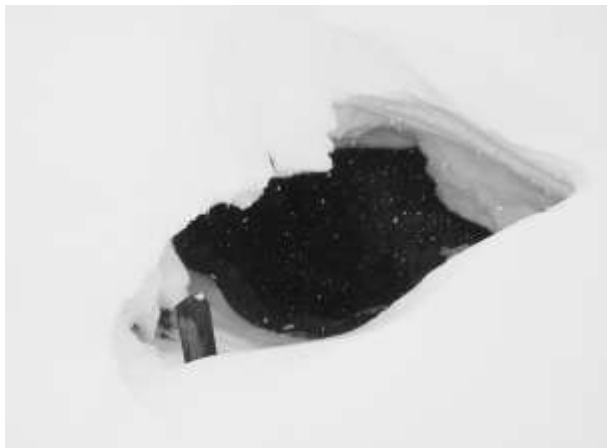


Abb. 2: Ein typisches Blasloch; durch die warme Höhlenluft schmilzt die Schneedecke ab. Foto: LZ

Welche Temperaturdifferenz wird benötigt damit eine kontinuierliche Luftzirkulation entsteht?

Um diese Frage zu beantworten, wurden neun Höhleneingänge in der Region Melchsee-Frutt mit Temperaturloggern bestückt. Zudem wurden Windgeschwindigkeitsmessungen bei unterschiedlichsten Temperaturdifferenzen durchgeführt. Aus einem Teil der Messungen

der Geschwindigkeit und den Temperaturdifferenzen wurde mittels Modell von Lismonde (Formel 1) die Luftzirkulation zwischen Juli und Dezember modelliert. Der andere Teil der Feldmessungen diente zur Überprüfung des Modells.

$$U = K \sqrt{\Delta T}$$

Formel 1: Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit zur Temperaturdifferenz (Lismonde, 2002)

- Wobei:
 U = Windgeschwindigkeit in m/s
 K = Konstante
 ΔT = Temperaturdifferenz innen/ausen

Die Konstante K wurde in der Diplomarbeit empirisch aus Messungen der Windgeschwindigkeit und Temperaturdifferenzen bestimmt.³

Wie wir in Abbildung 4 erkennen können zeigt jeder Höhleneingang ein anderes Verhalten an. Beim den Eingängen B2 und M69 kann schon bei einer geringen Temperaturdifferenz eine Luftströmung beobachtet werden, bei den Eingängen der Mäanderhöhle und M66 steigt die Windgeschwindigkeit jedoch nie über 1 m/s an.

³ Gemäss Lismonde (2002) und Filipponi (2000) kann die Konstante K bei folgenden bekannten Parametern berechnet werden: Ganglänge, Gangdurchmesser, Höhendifferenz, Höhlentemperatur sowie Reibungskoeffizienten.

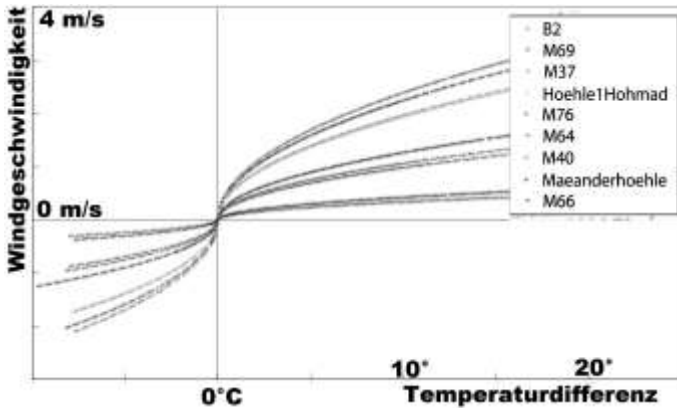


Abb. 4: Die modellierten Windgeschwindigkeiten in Abhängigkeit zur Temperaturdifferenz

Zusätzlich wurden die Resultate des Modells mit einer Faustregel von Filippini (Formel 2) verglichen.

$$\Delta T_{conv} \approx \frac{3.16 \Delta z}{\Delta z}$$

Formel 2: Faustregel zur Berechnung der minimalen Temperaturdifferenz, welche benötigt wird damit eine konvektive Luftzirkulation entsteht (Filippini, 2000)

Wobei:

ΔT_{conv} = die notwendige Temperaturdifferenz für konvektive Luftbewegungen [°C]

Δz = die vermutete Höhendifferenz der Eingänge [km]

Ausserdem konnten die Temperaturkurven der Temperaturloggern im Eingangsbereich interpretiert werden und ebenso mit der Faustregel und dem Modell verglichen werden. Bei ausströmendem Höhlenwind kann eine konstante Temperatur im Eingangsbereich festgestellt werden. Wird hingegen Luft aus der Aussenatmosphäre angesaugt oder kann keine klare Windrichtung definiert werden, zeigt die Temperaturkurve die Temperatur der einströmenden Luft oder des durch die Aussenatmosphäre geprägten Eingangsbereichs an. (Abbildung 5)

Die Messungen im Feld zeigten eine Zuverlässigkeit der Modelle zwischen 75% (Faustregel und Interpretation der Temperaturkurven) und 95% (Modell der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit zur Temperaturdifferenz), d.h. 75% bzw. 95% der Feldmessungen liessen sich mit Hilfe der Modelle voraus sagen.

Die benötigte Temperaturdifferenz beträgt im Untersuchungsgebiet etwa sechs Grad. Als einfache Annäherung kann die Faustregel von Filippini verwendet werden. Mittels geschätzter Höhendifferenz und mittlerer jährlicher Lufttemperatur als Schätzwert für die Temperatur im Höhleninnern kann die Temperatur bestimmt werden, bei der eine Prospektion mittels Thermalbildtechnik erfolgreich sein kann.⁴

Welche Temperatur weist die ausgeströmte Luft aus?

Aus den oben genannten Daten konnte die Temperatur der ausgeströmten Luft bestimmt werden. Diese liegt zwischen 2°C und 4°C. Es fällt auf, dass Höhlensysteme mit einer grösseren Höhendifferenz, aber den meteoriefen Eingängen auf gleicher Höhenlage, tiefere Temperaturen aufweisen. Ebenso liegt die Temperatur der ausgeströmten Luft bei Höhlen mit Eis im Eingangsbereich tiefer. Es kann davon ausgegangen werden, dass die ausgeströmte Luft ca. die gleiche Temperatur wie die Luft im Höhleninnern hat. Die Höhlenlufttemperatur ist geprägt von der mittleren jährlichen Lufttemperatur (MAAT)⁵ auf gleicher Höhenlage und der mittleren jährlichen Temperatur des versickerten Wassers. Wahrscheinlich kann auch davon ausgegangen werden, dass im Winter die Temperatur der ausgeströmten Luft eher der MAAT bei den meteoriefen Eingängen entspricht, also ein bis zwei Grad

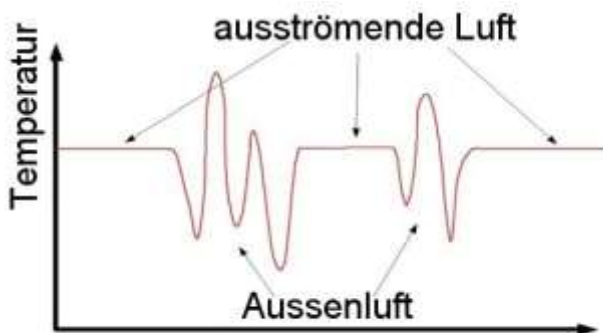


Abb. 5: Interpretation einer Temperaturkurve im Eingangsbereich (nach Lismonde 2002)

⁴ Es sind jedoch noch einige andere Faktoren massgeblich an einem Gelingen eines solchen Unterfangens beteiligt.

⁵ Mean annual air temperature

wärmer ist (im Untersuchungsgebiet Melchsee-Frutt) und im Sommer eher die MAAT der meteohohen Eingängen beobachtet werden kann.⁶

Identifikation: Visuelle Interpretation mit zusätzlichen Geodaten

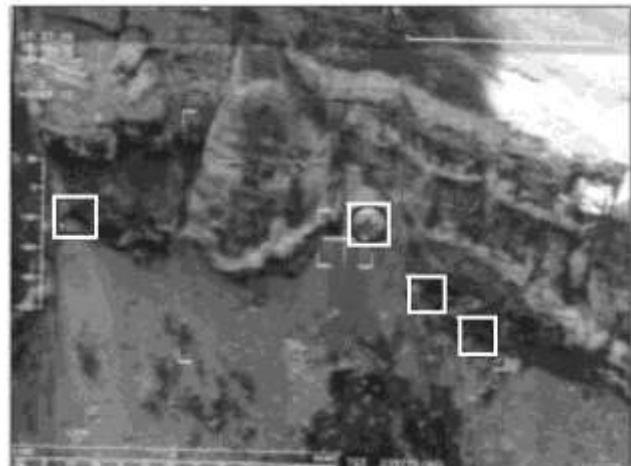
Das Suchen nach Höhleneingängen in thermalen Infrarotaufnahmen stellt eine grosse Herausforderung dar. Zum einen sind Höhleneingänge relativ klein und das Aufspüren im Bild gleicht dem Suchen einer Stecknadel im Heuhaufen. Durch ein grosses Vorwissen über das aufgenommene Gebiet kann die Detektion erheblich vereinfacht werden.

Eine weitere Schwierigkeit entsteht durch die verschiedenen Bedingungen zwischen Winter und Sommer. Im Winter ergibt die Schneeoberfläche ein „ruhigeres“, gleichmässigeres Wärmebild. Doch können Bäume und Blaslöcher je nach Beleuchtungssituation sehr ähnliche Signale im Bild ergeben. Nachtaufnahmen können hier Abhilfe verschaffen. Im Sommer ist durch die verschiedenen Untergründe (Fels, Schutt, Gras, Feuchtstellen etc.) ein unruhiges Bild zu erwarten. Um ein reales Bild der Temperaturverteilungen zu erhalten, müssten für jeden Untergrund die Emissionskoeffizienten bekannt sein.

Um die Interpretation zu vereinfachen, sollten räumlich gut aufgelöste Zusatzdaten verfügbar sein. Mit Hilfe von Oberflächenmodell⁷, Informationen über geomorphologische Formen, Geologie und sehr guten Orthophotos⁸ (idealerweise alle Informationen als GIS⁹-Ebenen verfügbar) können Flächen ausgeschieden werden, auf welchen keine Höhleneingänge zu erwarten sind (wie z.B. Schutthalden, Moränen, Sumpfgebiete etc.).

Zudem muss unbedingt darauf geachtet werden, dass möglichst wenig Sonnenlicht das Gelände erwärmt. Im Winter liegt der ideale

Zeitpunkt am morgen früh vor Sonnenaufgang nach einer kalten klaren Nacht. Die Geländeabstrahlung und die Temperaturdifferenz zwischen Gelände und Höhlenwind sind dann am grössten. Im Sommer sollte jedoch nach einem trockenen schönen warmen Sonntag kurz nach Sonnenuntergang aufgenommen



werden.

Abb. 6: Eine Felswand im Sommer. Die Höhleneingänge sind im Bild im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums kaum zu erkennen.

Die Abbildung 6 zeigt eine „normale“ Foto einer Felswand. Erst im Wärmebild der Felswand (Abbildung 7) werden die Höhleneingänge als dunkle (kalte) Flecken ersichtlich. Eine dieser neu entdeckten Höhlen wurde vermessen. Sie endet nach 65 m in einem Versturz, durch welchen kalte Luft (~0°C) hindurchbläst, was einen grösseren Hohlraum dahinter vermuten lässt.

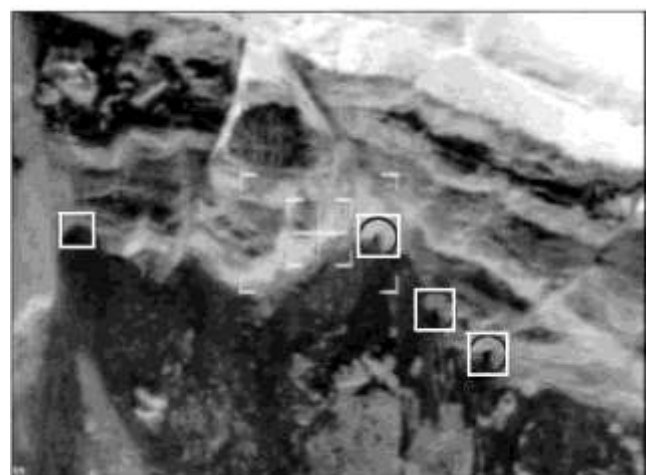


Abb 7: Der gleiche Ausschnitt wie in Abbildung 6. Im Thermalbild können die Höhleneingänge klar erkannt werden.

⁶ Diese Hypothese konnte jedoch im Rahmen der Diplomarbeit nicht überprüft werden.

⁷ Es wird unterschieden zwischen Geländemodell (ohne Bäume, Häuser etc.) und Oberflächenmodell (mit den Höhen der Objekten auf dem Gelände).

⁸ Ein Orthophoto ist ein geometrisch (auf die Kartenebene) korrigiertes Luftbild.

⁹ Geographisches Informations System (digitale Geoinformationen als Raster- oder Vektordatensätze)

Probleme der Lokalisierung

Das Bildmaterial für meine Diplomarbeit stammt von der Schweizer Armee. Im Bild werden die Koordinaten des Helikopters und jene des Bildmittelpunktes angezeigt. Die Koordinaten des Bildmittelpunktes werden aus GPS-Position und Ausrichtung (Azimut, Quer- und Längsneigung) des Helikopters sowie Neigungswinkel und Azimut des Sensors und dem digitalen Geländemodell berechnet. Weil das GPS-System (auf ziviler Basis) bei hoher Fluggeschwindigkeit leicht verzögert reagiert, kommt es bereits hier schon bis zu einigen Metern Abweichung zur realen Position. Das System, welches die Lage des Helikopters im Raum (also Azimut, Quer- und Längsneigung) berechnet, reagiert auf Bewegungen ebenfalls leicht verzögert. Dies zeigt sich vor allem bei Windstößen und beim Drehen um die Hochachse. Als dritte Ungenauigkeit ist die Berechnung des Durchstichpunktes im Gelände zu erwähnen. Je genauer das Geländemodell ist (in meiner Arbeit wurde ein DHM25 verwendet) und desto flacher der Sensorstrahl auf die Oberfläche auftrifft, desto ungenauer werden die berechneten Koordinaten des Bildmittelpunktes. Untersuchungen in der Diplomarbeit haben gezeigt, dass bei Schrägaufnahmen (je nach Aufnahmewinkel, Flughöhe und -geschwindigkeit) mit Abweichungen zwischen 50 und mehreren hundert Metern gerechnet werden muss. Auch bei Senkrechtaufnahmen kann die Abweichung immer noch zwischen 50 und 100 m betragen.

Damit wurde schnell klar, dass das System ohne Referenzpunkte im Feld für die Höhlenforschung suboptimal ist. Eine Möglichkeit bietet das Aufzeichnen der Umgebung, d.h., das Hinauszoomen um einen Überblick zu schaffen. Dies dauert jedoch eine Weile und geht auf Kosten der Flugzeit. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Bilder geometrisch zu entzerren und auf die Kartenebene zu georeferenzieren. Dazu sind Längs- und Querüberdeckungen der Einzelbilder, sowie markante Referenzpunkte in den Randbildern notwendig. Natürlich müssen die genauen Koordinaten der Referenzpunkte bekannt sein, ebenso die Parameter des Sensors (Brennweite und Verzerrungen durch die Linse) und die 3D-Koordinaten des Aufnahmezentrums (also die Position des Sensors im Raum). Die Berechnungen der Lage der Bilder und das Entzerren kann mittels Spezialsoftware durchgeführt werden. Bei den

so georeferenzierten Bildern konnte ein Mosaikbild aus 53 Einzelbildern hergestellt werden. Die mittlere Lagegenauigkeit im Mosaikbild konnte so auf 12 m heruntergesetzt werden.

Möglichkeiten für die Höhlenforschung

Da eine Befliegung mittels Helikopter sehr teuer ist und die Verfügbarkeit von Sensoren und Helikoptern sehr beschränkt ist, muss für die Höhlenforschung eine praxistaugliche Alternative gefunden werden. Dies kann z. B. ein Handsensor auf einem Stativ sein. Damit kann man im Feld Felswände nach Höhleneingängen absuchen, oder von erhöhten Flächen (z. B. Gamserrugg oder Chäserrugg) auf ein Karrenfeld hinunter Wärmebilder aufzeichnen. Eine weitere Möglichkeit ist auf unbemannten Flugobjekten (Drohnen, ferngesteuerte Helikopter, Flugzeuge oder Zeppeline) eine Wärmebildkamera zu installieren und so das Gelände nach Höhleneingängen abzusuchen.

Diese Technik birgt sicher noch viel Potential in sich. Mittels einem thermal kalibriertem Sensor¹⁰ könnten absolute Temperaturen bestimmt werden. Anhand dieser Temperaturen kann eine Aussage über die Höhenerstreckung einer Höhle gemacht werden. Angenommen, wir finden zwei Eingänge auf ungefähr gleicher Höhenlage und ein Eingang weist eine tiefere Temperatur als der andere auf, so wird beim Eingang mit tieferer Temperatur die Luft in höher gelegenen Eingängen angesaugt.

Wärmebilder eines Forschungsgebietes sollen idealerweise sowohl im Winter, als auch im Sommer gemacht werden. Dadurch erhält man die meteotiefen (im Sommer) und meteohohen Eingänge (im Winter) und kann so die geographische Lage und Ausdehnung eines Höhlensystems ermitteln.

¹⁰ Für einen thermal kalibrierten Sensor braucht man pro Bild zwei Temperaturmessungen auf gleichen Oberflächen sowie möglichst genaue Emissionskoeffizienten der abgebildeten Materialien (Feld- oder Labormessungen oder auch Näherungswerte aus der Literatur).

Zusammenfassung

Die Grundlage für eine Detektion von Höhleneingängen mittels thermalen Infrarotaufnahmen bildet das Phänomen von konvektiven Windzirkulationen zwischen Höhle und Aussenatmosphäre. Im Sommer sinkt die Höhlenluft ab und im Wärmebild können die meteotiefen Höhleneingänge entdeckt werden. Im Winter steigt die Höhlenluft auf und die meteohohen Eingänge können entdeckt werden.

Ab einer gewissen Temperaturdifferenz zwischen Höhlenluft und Aussenluft, welche mit der Faustregel von Filipponi (2000) angenähert bestimmt werden kann, ist in einer Karstregion mit Luft ausblasenden Höhleneingängen zu rechnen. Die Temperatur der ausströmenden Luft entspricht ungefähr der mittleren jährlichen Lufttemperatur auf der Höhenlage der Höhlen.

Um in Wärmebildern Höhleneingänge zu identifizieren muss ein grosses Vorwissen über die Karstregion vorhanden sein. Idealerweise sollten digitale Karten der Geomorphologie, der Geologie, hochaufgelöste Luftbilder und ein hochauflösendes Geländemodell zur Verfügung stehen.

Die Lokalisierung der gefundenen Eingänge stellt ein weiteres Problemfeld dar. Bei guter Gebietskenntnis kann eventuell auf eine geometrische Entzerrung und Georeferenzierung verzichtet werden.

Literatur (nicht abschliessend)

- BACHMANN, A. (1975). Vergleichende Untersuchung von Oberflächenformen auf panchromatischen Luftbildern und Scanneraufnahmen im thermalen Infrarot-Bereich am Beispiel der Karstmorphologie, Diplomarbeit am Geographischen Institut Zürich
- DROST, C. A., KARGEL, J. S., TITUS, T. N., TOOMEY, R. S. & WYNNE, J. J. (2006). A Strategy to Identify Instrumentation and Mission Requirements for Finding Subterranean Areas to Investigate for Evidence of Martian Life
- FILIPPONI, M. (2000). Höhlenklimaskript, AGS Regensdorf
- HALL, M. (2003). Micro-temperature Variations of Surface Karst.
- ITTEN, K. I. (1973). Die Verwendung thermaler Infrarot-Aufnahmen bei geographischen Untersuchungen, Dissertation an der Universität Zürich.
- LISMONDE, B. (2002). Climatologie du monde Souterrain, tome 1 et 2. Vent des Ténèbres, Aérologie des systèmes karstiques, Éd. du Comité départemental de spéléologie de l'Isère, Grenoble
- LUETSCHER, M., JEANNIN, P.-Y. (2004). Temperature distribution in karst systems, the role of air and water fluxes, *Terra Nova* Nr. 16, S. 344 – 350
- MAUREL, P. (2001). Thermographie à la Tête de Cade, *Lettre d'info du CDS 06* No 2-01 février-avril 2001 S.15/16.
- TRÜSSEL, M. (1997). Höhlensuche mit Infrarot-Flugaufnahmen in alpinen Karstgebieten. In: Karst und Höhlenforschung in Ob- und Nidwalden, Band 1, S.66 - 73. Herausgeber: Nagon, Grafenort